

埋地钢质管道阴极保护电绝缘测试方法应用分析

陈振华¹, 程玉魁², 高俊涛², 满秀清², 解晓博³

(1.国家管道北方管道有限责任公司管道科技研究中心, 河北 廊坊 065000;
2.河北安科工程技术有限公司, 石家庄 050051; 3.东北石油管道有限公司, 沈阳 110031)

摘要: 围绕近年来普遍出现的埋地钢质管道输油气站场和阀室电绝缘失效问题, 结合已开展的80座站场和阀室的电绝缘测试结果, 介绍了目前阴极保护系统电绝缘失效的现状及其失效形式, 以实际工程案例分别阐述了目前常用的电绝缘测试方法的适用性和应用条件。基于现场测试数据和电路模型, 分析和探讨了现有电位法和漏电率法测量误差的成因, 以及采用电流环法和电压法判断绝缘失效时的应用条件。此外, 结合实际工程经验, 介绍了外部搭接、导电介质沉积和绝缘装置失效等3种典型的埋地钢质管道电绝缘失效故障的特征, 并推荐了不同电绝缘失效形式下的排查方法, 可帮助测试人员快速准确地排查电绝缘失效故障。

关键词: 阴极保护; 电绝缘; 漏电率; 绝缘接头; 泄漏电流; 电流环

中图分类号: TE9 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)04-0028-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.04.004

Analysis on Application of Electric Insulation Testing of Cathodically Protected Underground Steel Pipelines

CHEN Zhen-hua¹, CHENG Yu-kui², GAO Jun-tao², MAN Xiu-qing², XIE Xiao-bo³

(1. Pipe China North Pipeline Co. Ltd R & D Center, Langfang 065000, China; 2. Hebei Anke Engineering and Technology Co. Ltd., Shijiazhuang 050051, China; 3. Northeastern Petroleum Pipeline Co. Ltd., Shenyang 110031, China)

ABSTRACT: The paper based on electric insulation testing in eighty oil & gas stations and valve chests of cathodically protected buried steel pipelines to introduce the status and characteristic of electric insulation fault in Cathodic protection system, and the usability and application conditions of normal inspection methods for electric insulation troubleshooting. Depending on the actual testing data and electrical simulation model, the errors as well as the cause in some testing methods, such as potential measurement, current leakage rate measurement, have been analyzed. Moreover, the characteristic and performance of external lap, conducting medium deposition and insulation device failure, focused on these three typical electric insulation fault, the specific troubleshooting methods have been recommend, which could be useful for inspector to locate the fault quickly and accurately.

KEY WORDS: cathodic protection; electric insulation, current leakage rate; insulating joint; current leakage; current loop

收稿日期: 2020-12-07; 修订日期: 2020-12-29

Received: 2020-12-07; Revised: 2020-12-29

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2016B-3017-0503)

Fund: Supported by Science & Technology developing Projects of Petrochina (2016B-3017-0503)

作者简介: 陈振华(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为埋地钢质管道腐蚀防护与检测评价。

Biography: CHEN Zhen-hua (1985—), Male, Master, Research focus: corrosion & protection and inspection & assessment.

引文格式: 陈振华, 程玉魁, 高俊涛, 等. 埋地钢质管道阴极保护电绝缘测试方法应用分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(4): 028-032.

CHEN Zhen-hua, CHENG Yu-kui, GAO Jun-tao, et al. Analysis on application of electric insulation testing of cathodically protected underground steel pipelines[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(4): 028-032.

电绝缘是埋地钢质管道实施阴极保护的基本条件。通常，在长输管道与各分输站、支线的连接处都安装了电绝缘装置。如绝缘装置、绝缘法兰、绝缘短管等，其作用是将非保护管段与被保护管段绝缘分隔，以防止阴极保护电流的漏失，使被保护管段得到有效保护。同时，在杂散电流干扰区，还可以用于隔开干扰区和非干扰区，以减少杂散电流的干扰影响范围^[1]。

目前，在长输管道的输油气站场、阀室的电绝缘失效成为了一种普遍存在的问题^[2-4]。管道运营公司每年都投入了大量的人力物力来排查输油气站场和阀室的电绝缘问题，已成为长输管道阴极保护系统日常运行维护工作中一项常规工作。阴极保护电绝缘一旦失效，阴极保护电流就会由接地极大量漏失，导致管道阴极保护有效率降低^[4]。通过故障排查发现，引起电绝缘失效的原因有多种。笔者调查了 80 座存在电绝缘失效的站场和阀室，其中，因为绝缘装置本身失效的有 5 座，因为导电介质或水聚集导致的电绝缘失效的有 4 座，而绝大多数是由外部金属物搭接造成的。电绝缘的故障点往往比较隐蔽，排查过程十分复杂，需要综合运用多种方法进行逐一排查。文中结合实际案例分析了目前常用电绝缘测试方法的适用性，以及几种典型电绝缘失效的特征。

1 电绝缘测试方法应用效果分析

1.1 电位法

电位法是在实施了阴极保护的管道上来定性判断绝缘装置的绝缘性能的方法。如图 1 所示，图中 a 和 b 表示绝缘装置两侧的测量点，c 表示阴极保护电流的汇流点。测量时，绝缘装置一侧的阴极保护系统正常开启，保持硫酸铜电极位置不变，采用数字万用表分别测量绝缘装置（法兰）非保护端 a 点和保护端 b 点的管地电位 V_a 、 V_b 。若 V_a 与 V_b 有显著差异，则表明电绝缘性能可靠。当 V_a 与 V_b 的差值小于 100 mV 时，则无法判断电绝缘性能是否可靠^[5]。

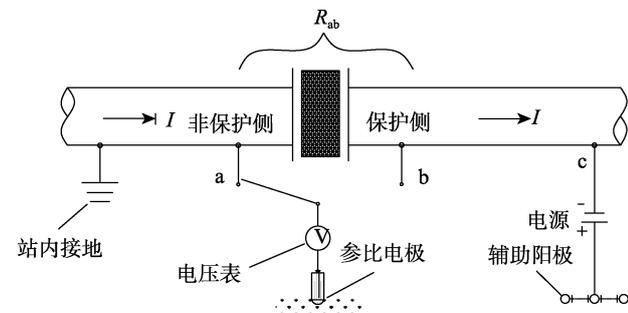


图 1 电位法测量示意

Fig.1 Sketch of potential measurement for insulating testing

该方法在实际生产中应用较多，是一种简单而快速测量和判断电绝缘性能的方法，同时也是一种容易

造成误判的方法^[6]。以两座成品油站场的电绝缘测试结果（表 1）为例。根据电位测试结果，判断两座站场的电绝缘性能可靠，但按照漏电率测试的结果，两座站场的电绝缘都是失效的。排查的结果是认为导电介质沉积，导致埋地的绝缘装置内部导通。造成电位测试结果误差的原因是：绝缘装置内部导通后，所测量的 V_a 和 V_b 实际都是非保护侧管道相对参比电极的电位。此时阴极保护电流流过绝缘装置，并流到汇流 c 点，由于 a 和 b 之间有一定的电阻 R_{ab} ，且有电流流动，则会在 a 和 b 之间形成电压差，而这部分电压差叠加到了 V_b 中。假设流过绝缘装置的电流为 10 A， R_{ab} 为 0.02 Ω ，a 和 b 之间的电压差就会达到 200 mV。因此，电位法虽然简单快捷，但实际测试时还要结合阴极保护系统的输出参数来综合判断，尤其在不清楚埋地绝缘装置的电绝缘性能时，还要结合其他测试方法进行评估^[5]。

表 1 绝缘装置电绝缘性能测试数据

Tab.1 Data of electric insulation testing on insulating device

站场	位置	电位测试		PCM 漏电率/%	电流环漏电率/%
		站外保护端/mV	站内非保护端/mV		
A	进站	-1350	-1080	84	73
	出站	-1350	-1080	2.2	0
B	进站	-820	-650	—	66
	出站	-1220	-660	—	—

1.2 漏电率法

漏电率测试的原理如图 2 所示。现场测试时，主要利用 RD-PCM 发射机在干线管道上施加一定量的交流电流，再利用接收机分别测量绝缘装置两侧管道上的电流，再根据式（1）计算出漏电率 η ^[7-8]。

$$\eta = \frac{I_1}{I_1 + I_2} \times 100\% \quad (1)$$

该方法测试结果直观，现场应用较多。该方法主要存在的问题是，即使不存在漏电的绝缘接头，也能测到一定的漏电率，如表 2 中两座站场的测量结果所示。造成这种测量误差的原因可能是：绝缘接头、绝缘法兰以及氧化锌避雷器、锌接地电池等属于容性设备，会形成一定的容性电流。以氧化锌避雷器为例，

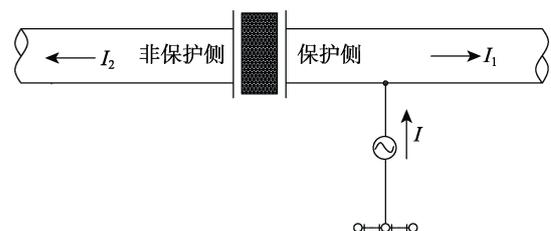


图 2 漏电率测量示意

Fig.2 Sketch of current leakage testing

表 2 某成品油管道站场绝缘装置漏电率测试数据
 Tab.2 Data of current leakage testing on insulating device in a petroleum pipeline station

站场	位置	漏电率测试结果		
		发射机输出 电流/mA	非保护端 电流/mA	漏电率/%
A 站	进站	1000	26	2.6
	分输	1000	22	2.3
B 站	进站	1000	17	1.7
	出站	1000	15	1.5
C 站	分输	1000	26	2.6
	进站	2000	36	1.8
	分输	2000	14	0.7

在电力行业，氧化锌避雷器是典型的容性设备，其等效电路如图 3 所示^[9]。通常需要监测其泄漏电流，并提取其中的阻性电流^[10]。在工作电压下，氧化锌避雷器泄漏电流很小，且主要为容性电流，所占比例大约为 80%~95%，其余部分为阻性电流^[11]。基于图 3 的等效电路，建立如图 4 所示的电路模型来进行仿真分析，图中 RC 电路来表示绝缘装置。现场实测绝缘装置的电容为 nF 级； R_1 表示站内管道的接地电阻，取 1Ω ； R_2 表示 PCM 发射机的接地电阻，取 10Ω ； R_3 站外管道的接地电阻，取 4Ω ， R_4 表示绝缘装置的绝缘电阻，取 $10 \text{ M}\Omega$ ；绝缘装置的电容取 5 nF ；施加 1 A ，频率为 4 Hz 的交流电流。利用 simulink 仿真得到如图 5 所示的结果。

根据图 5 中仿真结果，计算得到的漏电率为 2.2%，与实测结果吻合。从波形图可看出接收信号和输出信号之间的相位延迟 90° ，主要为容性电流。因此，采用 PCM 漏电率法测量时通常会测到一定的漏电率，这并非是绝缘性能下降导致的。关于该方面的研究还有待深入。根据工程经验，一般采用 PCM 测量到的漏电率不大于 15% 时，认为电绝缘性能是可靠的^[1]。

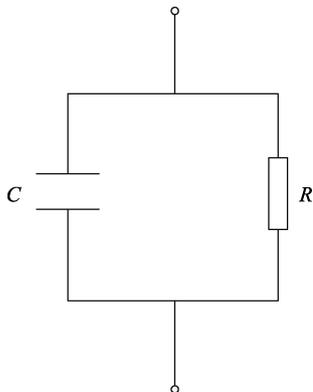


图 3 绝缘装置等效电路
 Fig.3 Equivalent circuit of insulating device

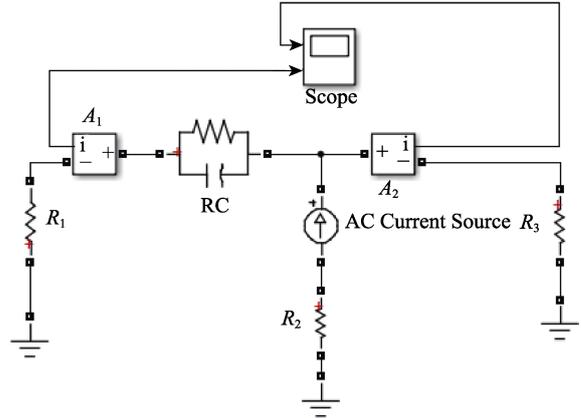


图 4 PCM 漏电率测量仿真电路
 Fig.4 Simulation circuit of PCM current leakage measurement

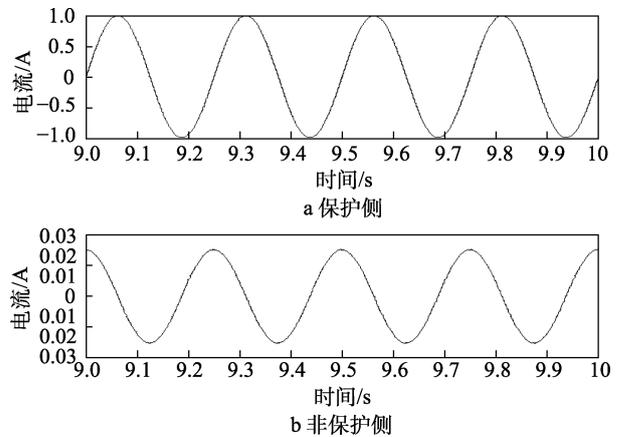


图 5 仿真电路电流波形
 Fig.5 Waveform of current in simulation circuit: a) protection side; b) un-protection side

1.3 电流环法

该方法是利用电流环或钳形电流表测量电流大小和方向来判断电绝缘性能的方法^[11]。电流环是基于霍尔效应开发的一种可直接测量管中直流电流的设备。通常，当怀疑电绝缘失效时，会采用该方法来进一步判断。测量时，将电流环安装在进、出站的绝缘装置附近，开启阴极保护系统，当电流环指示的电流大小稳定不变，且电流方向指向绝缘装置，则可判断绝缘装置失效。反之，则排除绝缘装置失效。测试时需多次调节输出电流，重复测量。由于仪器测量精度问题，一般适用于漏电流大于 1 A 的情况^[12]。

在安装了多个绝缘装置的站场或阀室内，可采用该方法来准确判定具体哪个绝缘装置失效。同样，当外部金属物搭接导致电绝缘失效时，可采用钳形电流表测量接地线或接地扁钢上的电流来排查搭接点。

1.4 电压降法

电压降法是采用电位差计或高精度的电压表测量管道上两点之间的电压降，根据电压降的大小和方向来判断绝缘装置是否失效。也可以通过电压降换

算电流,再与阴极保护电流进行比较来判断电绝缘状况^[13]。

现场测试证明,这种方法简单可行,适用于绝缘装置失效后,在主管道上测量,不适用于外部金属物搭接的情况。在进、出站的主管道上测量时,需关闭站内区域阴极保护系统,由于管道的电阻率非常低,要求测量仪表的分辨率达到微伏级。现场测量时,可适当增大阴极保护电流。

2 常见的电绝缘失效特征分析

2.1 外部金属物搭接

外部金属物搭接主要是站外管道与站内的接地网直接搭接,或通过其他装置搭接,多见于一些小型的分输站场或阀室。通常,小型分输站场在支管上安装绝缘法兰,而非在进、出站的主管道上安装绝缘接头。由于安装在主管道上的截断阀控制箱、温度变送器、压力变送器等装置都需要接地,一旦这些装置的电绝缘失效或未采取绝缘措施,就会导致站内外管道电导通。还有一些成品油站场,在进站位置会安装一套界面分析仪装置,该装置连接站外的主管道,而其接地极又连接到站内的接地网,这就导致了站内外电绝缘失效。当用钳形电流表在分析仪地面的支管上测量时,会发现大部分的阴极保护电流由此回流到阴极保护系统的汇流点。

当外部金属物搭接造成电绝缘失效时,在地面管道上基本没有电流流动,有时搭接点可能有多个,因此排查过程比较复杂。采用电位法测量时,会发现绝缘装置两侧的电位差基本为 0,电流主要在接地极上流动。此时,适合采用电流环或钳形电流表,配合地上绝缘装置测试仪来逐一排查电绝缘失效的故障点。

2.2 导电介质

导电介质引起的电绝缘失效有两种情况。一是输送介质中本身含有导电性的物质,如输送高矿化度气田水集输的管道^[14]。此时绝缘装置已无法起到绝缘的作用,而且绝缘装置非保护侧的内壁一般会快速地腐蚀。二是输送含有导电杂质的管道。如成品油管道中的铁锈,固体杂质会沉积在绝缘装置两侧底部,使两侧电导通,导致阴极保护电流泄漏^[15]。这种电绝缘失效的特征是,绝缘装置的绝缘性能是变化的,当完成清管后,电绝缘恢复,运行一段时间后,又出现电绝缘失效的情况。

当采用电位法测试时,一般能测量到几十到几百毫伏的电压差。如果由于水沉积引起电绝缘失效的问题长期存在,还会引起绝缘装置非保护侧管道发生严重的内腐蚀。这是因为电绝缘失效后,阴极保护电流由接地极进入站内管道,再从绝缘装置的一侧管道内壁流出,进入沉积水中,通过沉积水到达绝缘装置的

另一侧,再回流至汇流点。电流从管壁流出进入沉积水的过程就是金属腐蚀的过程。文献[16-17]中详细介绍了由沉积水导致的油田管道绝缘接头非保护侧内腐蚀穿孔泄漏形成的原因。文献[18]则通过有限元仿真,分析了绝缘接头非保护侧的电流密度分布和腐蚀发展的规律,探讨了绝缘接头非保护侧内腐蚀的影响因素和防护措施。

2.3 绝缘装置自身失效

绝缘装置自身的失效在实际生产中发现得并不多。除制造缺陷、外力破坏外,还有大电流冲击,如焊接、雷击电流等造成绝缘击穿。另外,阴极保护系统绝缘装置一般会安装防电涌保护器^[20]。这些保护器有时可能受潮短路,或绝缘击穿。当绝缘装置失效时,阴极保护电流会通过接地极流入安装绝缘装置的主管道上,再回流至汇流点。采用 RD-PCM、电流环或电压降法在进、出站的主管道上都能测量到电流,且电流方向指向绝缘装置。采用电位法测试时,也可能测量到一定的电压差。

3 结语

1) 阴极保护电绝缘测试方法各有局限性,甚至还容易造成误判,现场测试应选择 2 种或以上的方法进行测量,并相互验证。

2) 不同的阴极保护电绝缘失效形式的特征也不同,排查过程往往较为复杂。测试人员可以首先根据站场绝缘装置的设计资料和阴极保护系统输出参数的变化,初步判断绝缘失效的类型,再选择合适的测试方法来进一步测量和判断。

3) 阴极保护电绝缘测试和故障排查需要建立一套完整的检测流程,以帮助测试人员快速且准确地判断电绝缘性能及确定电绝缘失效的故障点,避免盲目地更换绝缘装置。

参考文献:

- [1] 陈振华,薛致远,于少鹏,等.在役管道绝缘接头绝缘性能测试技术应用[J].管道技术与设备,2013(2):1-3.
CHEN Zhen-hua, XUE Zhi-yuan, YU Shao-peng, et al. Application of insulation test technology of insulating joint for in-service pipeline[J]. Pipeline technique and equipment, 2013(2): 1-3.
- [2] 曾刚勇,韩兴平.输气管道阴极保护电绝缘装置失效检测与预防[J].天然气工业,2012,32(2):103-105.
ZENG Gang-yong, HAN Xing-ping. Inspection and countermeasure for the failures of electrical insulation device by cathodic protection[J]. Natural gas industry, 2012, 32(2): 103-105.
- [3] 柏晓鹤,刘军,李庆臣,等.自控阀室绝缘接头失效检测方法分析[J].管道技术与设备,2020(1):48-51.

- BAI Xiao-he, LIU Jun, LI Qing-chen, et al. Failure detection method analysis of insulated joint in automatic control valve chamber[J]. Pipeline technique and equipment, 2020(1): 48-51.
- [4] 李刚川, 邓同军, 汪恋, 等. 接地导致埋地管道阴极保护失效的应对措施[J]. 油气储运, 2019, 38(12): 1378-1382.
- LI Gang-chuan, DENG Tong-jun, WANG Lian, et al. Countermeasures for cathodic protection failure of buried pipelines caused by grounding [J]. Oil & gas storage and transport, 2019, 38(12): 1378-1382.
- [5] ISO 15589: 1: 2015, Petroleum, petrochemical and natural gas industries—Cathodic protection of pipeline systems-Part 1: On-land pipelines[S].
- [6] 钟富荣. 电位法判断绝缘法兰绝缘性能存在的问题[J]. 油气储运, 1999, 18(9): 37-39.
- ZHONG Fu-rong. Using potential measurement to determine the problem in insulation performance of insulating joint[J]. Oil & gas storage and transport, 1999, 18(9): 37-39.
- [7] 滕延平, 孙伶, 汪珉, 等. 管道电绝缘测试方法应用分析[J]. 管道技术与设备, 2018(2): 56-58.
- TENG Yan-ping, SUN Ling, WANG Min, et al. Application analysis of test methods about pipeline electrical insulation[J]. Pipeline technique and equipment, 2018(2): 56-58.
- [8] 刘文会, 滕延平, 刘加春, 等. 管道绝缘接头测试方法适用性研究[J]. 管道技术与设备, 2018(1): 9-12.
- LIU Wen-hui, TENG Yan-ping, LIU Jia-chun, et al. Applicability research of testing method for pipeline insulated joint[J]. Pipeline technique and equipment, 2018(1): 9-12.
- [9] 艾博, 牛会, 田晓. 容性设备绝缘状态在线监测与带电检测[J]. 内蒙古电力技术, 2016, 34(6): 61-64.
- AI Bo, NIU Hui, TIAN Xiao. Application analysis of capacitive equipment insulation online detection technology in substation[J]. Inner mongolia electric power, 2016, 34(6): 61-64.
- [10] 陈丹, 傅中君, 柳益君, 等. 一种氧化锌避雷器阻性电流的提取方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 117-122.
- CHEN Dan, FU Zhong-jun, LIU Yi-jun, et al. A method for the resistive current extraction of metal oxide surge arresters[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2019, 56(13): 117-122.
- [11] 张运. 氧化锌避雷器在线监测技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- ZHANG Yun. Investigation on online monitoring technology of zinc oxide arresters[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [12] 刘文会, 郝晓平, 滕延平, 等. 电流法在阀室阴极保护绝缘故障排查中的应用[J]. 管道技术与设备, 2020(5): 59-62.
- LIU Wen-hui, HAO Xiao-ping, TENG Yan-ping, et al. Application of current method in troubleshooting of cathodic protection insulation in valve chamber[J]. Pipeline technique and equipment, 2020(5): 59-62.
- [13] 刘文会, 沈光霁, 高强, 等. 电流环法测试管中电流技术应用[J]. 管道技术与设备, 2014(4): 3-5.
- LIU Wen-hui, SHEN Guang-ji, GAO Qiang, et al. Application of the swain meter to testing currents in pipeline[J]. Pipeline technique and equipment, 2014(4): 3-5.
- [14] 张俊义. 用管内电流法判断绝缘法兰及管道漏电[J]. 油气储运, 1990, 9(2): 44-49.
- ZHANG Jun-yi. Determine the current leakage on insulating joint of pipe by current flow in pipeline[J]. Oil & gas storage and transport, 1990, 9(2): 44-49.
- [15] 蒋志, 杜涓, 马鑫, 等. 混输高矿化度气田水集输管道绝缘接头附近非保护端管线上腐蚀分析及解决方案[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(3): 6-8.
- JIANG Zhi, DU Juan, MA li, et al. Analysis on and solutions to internal corrosion of non-protected pipeline nearby insulated joints of gathering and transportation pipelines for high-salinity gas-field water[J]. Total corrosion control, 2020, 34(3): 6-8.
- [16] 刘刚, 汤苑楠, 李博, 等. 成品油管道内杂质运移沉积及其影响规律[J]. 油气储运, 2017, 36(6): 708-715.
- LIU Gang, TANG Yuan-nan, LI Bo, et al. Movement, deposition and influence laws of impurities in the product oil pipelines [J]. Oil & gas storage and transport, 2017, 36(6): 708-715.
- [17] 赵玉飞, 张彦军, 郭继银, 等. 埋地管道绝缘接头内腐蚀失效分析及机理研究[J]. 材料保护, 2020, 53(7): 147-153.
- ZHAO Yu-fei, ZHANG Yan-jun, GUO Ji-yin, et al. Internal corrosion failure analysis and mechanism research of the insulating joint of the buried pipelines[J]. Materials protection, 2020, 53(7): 147-153, 171.
- [18] 李循迹, 宋文文, 周理志, 等. 阴极保护电绝缘装置内腐蚀穿孔分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(3): 328-332.
- LI Xun-ji, SONG Wen-wen, ZHOU Li-zhi, et al. Analysis of internal corrosion perforation of electrical insulating devices for cathodic protection[J]. Corrosion science and protection technology, 2017, 29(3): 328-332.
- [19] 陈立强, 董海涛, 陈长风, 等. 漏电导致阴极保护绝缘接头内腐蚀失效的有限元分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(5): 452-454.
- CHEN Li-qiang, DONG Hai-tao, CHEN Chang-feng, et al. FEM analysis of inner corrosion failure induced by current leakage for cathode protection insulating joint[J]. Corrosion science and protection technology, 2010, 22(5): 452-454.
- [20] 郭娟丽, 窦宏强, 闫明珍, 等. 阴极保护系统电绝缘装置的安装、评价及保护[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(2): 177-179.
- GUO Juan-li, DOU Hong-qiang, YAN Ming-zhen, et al. Installing, evaluation and protection of isolating device in cathodic protection system[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(2): 177-179.